

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ / TECHNOSPHERE SAFETY OF TRANSPORT SYSTEMS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.92>

О ВЛИЯНИИ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛАНОВО-ВЫСОТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА НА БЕРЕГОВОМ УЧАСТКЕ ПРОТОКИ

Научная статья

Аммосов Г.С.¹, Иванов Д.С.², Корнилова З.Г.^{3,*}, Антонов А.А.⁴, Корнилова В.В.⁵¹ORCID : 0000-0002-1098-6024;^{1,2,3,4,5} Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (zoya_korn[at]mail.ru)

Аннотация

Магистральные трубопроводы, эксплуатирующиеся в области распространения вечномерзлых грунтов, подвергаются различным экзогенным процессам. Их взаимодействие с многолетнемерзлыми грунтами является одним из основных факторов обеспечения надежности подземных магистральных трубопроводов.

В статье показано, что многолетним мониторингом планово-высотного положения магистрального газопровода нами выявлен участок берегового склона на протоке Хатасская через р. Лену, в котором дважды в год происходят интенсивные деформации. Также представлены графики их положений. Обнаружены изменения планово-высотного положения, достигающие 1 м, подтверждающие нашу гипотезу.

Целью данной работы является разработка математической модели подземного трубопровода и оценки напряжений в деформированной трубе по точечным измерениям планово-высотного положения подземного трубопровода. Для достижения поставленной цели необходимо решить задачу – восстановление функции пространственного положения трубопровода по точечным данным планово-высотного положения, пригодного для численных расчетов на участках подземного трубопровода.

Ключевые слова: подземные магистральные трубопроводы, планово-высотное положение, деформация, напряжения, мерзлый грунт, морозное пучение, оттайка грунта.

ON THE INFLUENCE OF CHANGES IN THE PLANNED-HIGH-ALTITUDE POSITION OF THE TRUNK PIPELINE ON THE ONSHORE SECTION OF THE CHANNEL

Research article

Ammosov G.S.¹, Ivanov D.S.², Kornilova Z.G.^{3,*}, Antonov A.A.⁴, Kornilova V.V.⁵¹ORCID : 0000-0002-1098-6024;^{1,2,3,4,5} V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russian Federation

* Corresponding author (zoya_korn[at]mail.ru)

Abstract

Main pipelines operating in the area of permafrost soils are exposed to various exogenous processes. Their interaction with permafrost soils is one of the main factors in ensuring the reliability of underground trunk pipelines.

The article demonstrates that by long-term monitoring of the planned-high-altitude position of the main gas pipeline we have identified a section of the coastal slope on the Khatasskaya channel through the Lena River, where intensive deformations occur twice a year. Graphs of their positions are also presented. The changes of planned-high-altitude position reaching 1 m were found, confirming our hypothesis.

The aim of this work is to develop a mathematical model of an underground pipeline and to evaluate the stresses in a deformed pipe using point measurements of the planned-high-altitude position of the underground pipeline. In order to achieve the objective, it is necessary to solve the problem – to recover the function of the spatial position of the pipeline from the point data of the planned-high-altitude position, suitable for numerical calculations in sections of the underground pipeline.

Keywords: underground trunk pipelines, planned altitude position, deformation, stresses, frozen ground, frost heaving, ground defrosting.

Введение

Подземные магистральные трубопроводы с большой протяженностью в районах многолетней мерзлоты подвергаются различным экзогенным процессам. Одним из основных факторов, определяющих эксплуатационную надежность, является их взаимодействие с многолетнемерзлыми грунтами. Экстремальные климатические и инженерно-геологические условия Северных регионов характеризуются низкими температурами воздуха, высоким уровнем грунтовых вод, заболоченностью и заторфованностью грунтов, глубоким сезонным промерзанием на участках локальных поднятий и подтоплением территорий во время весеннего и осеннего паводков [1], [2].

В условиях вечной мерзлоты существуют участки подземного трубопровода, в которых периодически происходят значительные деформации при сезонных процессах морозного пучения и протаивания грунта, где надежность подземного трубопровода снижается до предельно низкой величины задолго до истечения гарантированного проектом срока эксплуатации. Исходя из этого, следует, что поиск таких участков с последующим исследованием является актуальной.

Материалы и методы исследования

В связи с этим нами был проведен поиск участков с экзогенными мерзлотными процессами для мониторингового наблюдения протяженных металлоконструкций эксплуатирующихся в области криолитозоны. В осенний и весенний периоды происходят: максимальное промерзание грунта, а весной оттайка грунта. При этом надо отметить, что процессы морозного промерзания и пучения происходят более динамично, чем процессы оттаивания и просадок.

Рассматриваемый магистральный трубопровод (МТ) проложен в сложных инженерно-геологических условиях многолетнемерзлых грунтов, характеризующихся значительными перепадами высот и высокой вероятностью оттайки или морозного пучения.

Особую опасность представляет на пойменном участке для магистральных трубопроводов миграция влаги при промерзании и протаивании (оттайке) мерзлых грунтов и связанная с ними деформация земной поверхности, влияющая на оценку прочности и надежности конструкции в целом [3], [4]. Вследствие этого в трубопроводе возникают непроектные воздействия, приводящие к изменению планово-высотного положения (ПВП).

Многолетний мониторинг подземного газопровода показал, что имеются участки, где подземный трубопровод, проложенный в вечномерзлом грунте дважды в год деформируется различным образом. На рисунке 1 приведены данные измерений ПВП 2-й нитки газопровода ППИМГ через р. Лена на береговом участке протоки «Хатасская», проведенные в ряд последовательных сезонов 2016-2018 г.г.

Из рис. 1, а видно, что ПВП трубопровода в октябре 2016 г. примерно повторяло очертание грунта. Через полгода, в апреле 2017 г., в промерзшем грунте случился сильный прогиб вниз (более полутора метров) возле отметки 165 м (рис. 1, б). Еще через полгода, в октябре 2017 г., в оттаявшем грунте этот прогиб выпрямился и появился прогиб величиной около 2 метров возле отметки 130 м (рис. 1, в). По прошествии еще одного сезона, после замерзания грунта, в апреле 2018 года, этот прогиб тоже почти выпрямился, но появился прогиб величиной примерно 1 метр возле отметки 185 м (рис. 1, г).

Изменение высоты трубопровода в одной точке за одно замерзание или оттаивание может достигать величины до двух метров – это значительные деформации, как и возникающие при этом напряжения. Следовательно, величины деформаций трубопровода превышают возможные сдвиги грунта от морозных пучений.

Показанный на рис. 1 участок можно разделить на три части: склон со стороны поймы, дно протоки и склон со стороны острова. Все три части насыщены водой примерно одинаково. Морозные пучения на них должны проходить также примерно в равной мере, но результаты пучений наиболее сильно действуют на склоне со стороны поймы. На дне и склоне со стороны острова деформации значительно меньше, достигают нескольких десятков сантиметров, т.е. на уровне сдвига грунта при морозных пучениях. Это показывает, что на деформации трубы, кроме самого пучения, действует еще какой-то фактор. Мы предполагаем, что этим фактором является предварительное напряжение, возникшее при строительстве трубопровода. Поскольку склон с левой стороны протоки более крутой, во время укладки труба приобрела более сильный изгиб, чем на другом склоне, а по дну проложена прямо. На это предварительное напряжение налагается напряжение от морозных пучений, что и вызывает более сильные деформации.

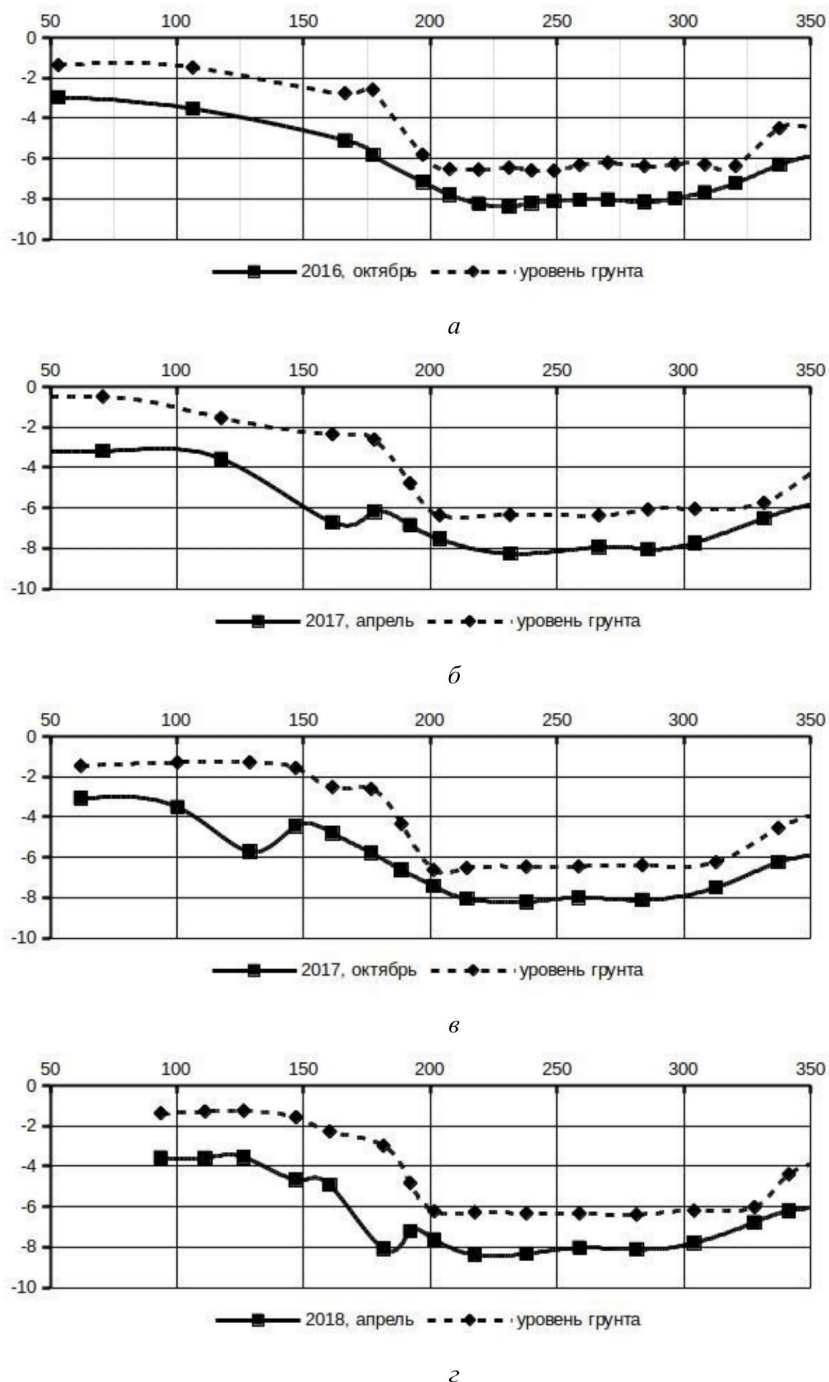


Рисунок 1 - Плано-высотные положения 2-й нитки газопровода ППМГ через р. Лена на береговом участке протоки «Хатасская»:

а - октябрь 2016 г.; *б* - апрель, 2017 г.; *в* - октябрь, 2017 г.; *г* - апрель 2018 г.; *квадрат* – измеренное положение трубопровода; *—* – интерполированное положение трубопровода; *ромб* – измеренное положение дневной поверхности грунта; *----* – интерполированное положение дневной поверхности грунта

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.92.1>

В результате измерений плано-высотных положений получают глубину залегания трубопровода с привязкой к плану местности в нескольких точках. Если труба отклонилась от прямолинейности только в одном участке, то по точечным данным можно выяснить стрелу прогиба, оценить радиус изгиба и возникшее напряжение по формуле [5], [6]:

$$\sigma = \frac{ED}{2r}, \quad (1)$$

где: E – модуль упругости, D – диаметр трубы, r – радиус изгиба.

В условиях вечной мерзлоты, из-за неравномерности морозных пучений встречаются участки, где прогибы идут без интервалов (рис. 1) – выпуклость сменяется вогнутостью, которая переходит в выпуклость и т. д. В таком случае из точечных данных невозможно выяснить стрелу прогиба. И именно на таких участках и происходят наибольшие

деформации. Предложено по точечным данным ПВП восстановить функцию пространственного положения трубопровода и оценить напряжения.

Для получения функции положения подземный трубопровод рассматривают как балку, лежащую на упругом основании [7], [8], описывающуюся уравнением

$$EI \frac{d^4 v}{dx^4} + P \frac{d^2 v}{dx^2} + cv = 0, \quad (2)$$

где: E – модуль упругости, I – момент инерции сечения, P – сжимающее усилие, c – коэффициент постели грунта, v – поперечное перемещение трубы.

В уравнении считается, что глубина залегания трубы постоянная, свойства грунта однородны либо кусочно-однородны. Сжимающее усилие рассматривается как независимая переменная и в зависимости от него исследуется устойчивость трубопровода. Реакция грунта на давление трубы моделируется по закону Гука и задается коэффициентом постели.

Для поставленной задачи это уравнение не подходит. В наших измерениях глубина трубопровода не является постоянной величиной. Реакция грунта из-за неравномерных морозных пучений может значительно меняться на расстоянии нескольких метров. Сложность представляет определение сжимающих усилий, трение стенок трубы из-за неравномерного заземления при морозном пучении.

В работе [9] из вариационного принципа выводится уравнение для произвольного подземного трубопровода в общем виде. В случае прямолинейного трубопровода уравнение выглядит так:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + S \frac{d^2 w}{dx^2} = r + q, \quad (3)$$

где: E – модуль упругости, I – момент инерции сечения, S – равнодействующая продольных усилий, r – реакция грунта, q – вертикальная распределенная нагрузка, w – вертикальное перемещение трубы.

Во многие используемые математические модели подземного трубопровода как независимый параметр входят продольные усилия, которые рассчитываются исходя из условий укрепления краев рассматриваемого участка, наличия компенсаторов и температурных расширений.

В нашей задаче точки укрепления трубопровода могут находиться достаточно далеко от изучаемого участка. Чтобы применить устоявшиеся модели, необходимо будет измерить очень длинные участки. Также и при численном решении потребуются очень большие вычислительные ресурсы.

По этой причине нами получено уравнение подземного трубопровода, в котором нет явной зависимости от продольных усилий [10].

$$EI \frac{d^4 Z}{dx^4} - \frac{D\rho_{лg}}{2} \cdot \frac{d^2 Z}{dx^2} + p - q + \rho_{лg} = 0, \quad (4)$$

где: E – модуль упругости; I – момент инерции сечения; D – диаметр трубопровода; $\rho_{л}$ – линейная плотность трубы; q – реакция грунта; p – вертикальная распределенная нагрузка; Z – вертикальное положение оси трубы.

Обсуждение

На рис. 2 показано решение уравнения подземного трубопровода по данным, полученным в октябре 2018 г. при измерениях ПВП трубопровода на береговом участке протоки «Хатасская». Сплошной линией показано полученное решение уравнения. Квадратами – измеренные глубины трубопровода. Пунктирной линией – уровень грунта. Как видно, решение близко подходит к измеренным точкам – программа вычисляет довольно точно.

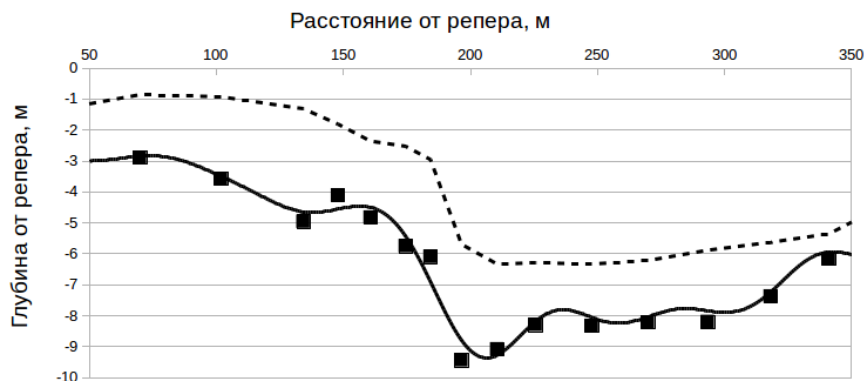


Рисунок 2 - Решение уравнения подземного трубопровода
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.92.2>

На рис. 3 показаны напряжения в трубопроводе, вычисленные из полученного решения уравнения (4) подземного трубопровода. Трубопровод изготовлен из стали марки 13Г1СУ, предел текучести которого 390 МПа. На отметках 170, 200 и 230 м напряжения превосходят предел текучести, в этих точках произошли пластические деформации.



Рисунок 3 - Напряжения в подземном трубопроводе
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.92.3>

Заключение

По результатам измерений плано-высотного состояния ППМТ на береговом участке протоки Хатаская выявлен участок с большими сезонными деформациями. Величины деформаций превышают сдвиги грунта от морозных пучений.

Возможно, большие деформации связаны с предварительными напряжениями трубопровода, полученными во время строительства, заложенными в проект для перехода через пересеченные места с малым перепадом уровней.

Показано, что метод упругого изгиба, часто используемый в проектировании трубопроводов, приводит к аварийному состоянию. Вероятно, есть предел предварительного упругого напряжения, и трубопровод от малых пучинистых сдвигов получает значительные деформации.

Разработана математическая модель подземного трубопровода по точечным измерениям плано-высотного положения, где смоделирована реакция грунта, действующая сверху и снизу на трубопровод при неравномерных морозных пучениях. Решение полученного уравнения дает возможность оценивать НДС подземного трубопровода.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Рег. № 121032200044-3, научная тема FWRS-2021-0039).

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.92.4>

Funding

This work was done within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Reg. No. 121032200044-3, research topic FWRS-2021-0039).

Conflict of Interest

None declared.

Review

International Research Journal Reviewers Community
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.145.92.4>

Список литературы / References

1. Лазарев С.А. Диагностирование протяженных пространственно-деформируемых участков магистральных газопроводов в системе управления техническим состоянием и целостностью ПАО «Газпром» / С.А. Лазарев, С.А. Пульников, Ю.С. Сысоев // Территория Нефтегаз. — 2016. — №4. — С. 106-115.
2. Лазарев С.А. Оценка технического состояния линейной части магистрального газопровода на участках со значительными пространственными деформациями / С.А. Лазарев, С.А. Пульников, Ю.С. Сысоев // Газовая промышленность. — 2016. — №9(743). — С. 84-90.
3. Permyakov P.P. Concerning the Bottom Erosion and Frost Heaving on the Section of the Underwater Crossing Route of MGL Across the River Lena / P.P. Permyakov, Z.G. Kornilova, G.S. Ammosov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2020. — Vol. 666. — DOI: 10.1088/1755-1315/666/3/032005.
4. Лебедев М.П. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния трубопровода при пучении грунта / М.П. Лебедев, П.П. Пермяков, Дж.С. Иванов [и др.] // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. — Якутск, 2018. — Т. 25. — №3. — С. 114-120.
5. Икрин В.А. Сопротивление материалов с элементами теории упругости и пластичности / В.А. Икрин. — М.: Изд. АСВ, 2004. — 424 с.
6. Справочник по сопротивлению материалов / Под ред. Г.С. Писаренко. — Киев: Наук. думка, 1988. — 736 с.
7. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость / А.Б. Айнбиндер, А.Г. Камерштейн. — М.: Недра, 1982. — 340 с.
8. Ясин Э.М. Устойчивость подземных трубопроводов / Э.М. Ясин, В.И. Черников. — М.: Недра, 1967. — 119 с.

9. Шаммазов А.М. Расчет и обеспечение прочности трубопроводов в сложных инженерно-географических условиях / А.М. Шаммазов, Р.М. Зарипов, В.А. Чичелов [и др.] — М.: Интер, 2005. — Т. 2. — 563 с.

10. Иванов Дж.С. Вывод уравнения подземного трубопровода для применения в расчетах напряженно-деформированного состояния при воздействии неравномерных морозных пучений / Дж.С. Иванов, Г.С. Аммосов, З.Г. Корнилова // Трубопроводный транспорт: теория и практика. — 2022. — №1(81). — С. 27-30.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Lazarev S.A. Diagnostirovanie protjazhennyh prostranstvenno-deformiruemyh uchastkov magistral'nyh gazoprovodov v sisteme upravlenija tehničeskim sostojaniem i celostnost'ju PAO «Gazprom» [Diagnostics of the extended spatially deformable sections of the main gas pipelines in the system of technical condition and integrity management of PJSC "Gazprom"] / S.A. Lazarev, S.A. Pul'nikov, Ju.S. Sysoev // Territorija Neftegaz [Territory of Neftegaz]. — 2016. — №4. — P. 106-115. [in Russian]

2. Lazarev S.A. Ocenka tehničeskogo sostojanija linejnoj časti magistral'nogo gazoprovoda na uchastkah so značitel'nymi prostranstvennymi deformacijami [Assessment of the technical condition of the linear part of the main gas pipeline in sections with significant spatial deformations] / S.A. Lazarev, S.A. Pul'nikov, Ju.S. Sysoev // Gazovaja promyšlennost' [Gas industry]. — 2016. — №9(743). — P. 84-90. [in Russian]

3. Permyakov P.P. Concerning the Bottom Erosion and Frost Heaving on the Section of the Underwater Crossing Route of MGL Across the River Lena / P.P. Permyakov, Z.G. Kornilova, G.S. Ammosov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2020. — Vol. 666. — DOI: 10.1088/1755-1315/666/3/032005.

4. Lebedev M.P. Čislennoe modelirovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija truboprovoda pri pučenii grunta [Numerical modelling of the stress-strain state of the pipeline underground swelling] / M.P. Lebedev, P.P. Permjakov, Dzh.S. Ivanov [et al.] // Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki [Natural Resources of the Arctic and Subarctic]. — Yakutsk, 2018. — Vol. 25. — №3. — P. 114-120. [in Russian]

5. Ikrin V.A. Soprotivlenie materialov s jelementami teorii uprugosti i plastičnosti [Resistance of materials with elements of the theory of elasticity and plasticity] / V.A. Ikrin. — M.: Publishing House ASV, 2004. — 424 p. [in Russian]

6. Spravočnik po soprotivleniju materialov [Handbook of materials resistance] / Ed. by G.S. Pisarenko. — Kyiv: Nauk. dumka, 1988. — 736 p. [in Russian]

7. Ajnbinder A.B. Rasčet magistral'nyh truboprovodov na pročnost' i ustojčivost' [Calculation of trunk pipelines for strength and stability] / A.B. Ajnbinder, A.G. Kamershtejn. — M.: Nedra, 1982. — 340 p. [in Russian]

8. Jasin Je.M. Ustojčivost' podzemnyh truboprovodov [Stability of underground pipelines] / Je.M. Jasin, V.I. Chernikin. — M.: Nedra, 1967. — 119 p. [in Russian]

9. Shammazov A.M. Rasčet i obespečenie pročnosti truboprovodov v slozhnyh inženerno-geograficheskih uslovijah [Calculation and ensuring the strength of pipelines in difficult engineering and geographical conditions] / A.M. Shammazov, R.M. Zarirov, V.A. Chichelov [et al.] — M.: Inter, 2005. — Vol. 2. — 563 p. [in Russian]

10. Ivanov Dzh.S. Vывод уравнения подземного трубопровода длџа применения в расчетах напряженно-деформированного состояния при воздействии неравномерных морозных пучений [Derivation of the underground pipeline equation for use in calculations of the stress-strain state under the influence of non-uniform frost heave] / Dzh.S. Ivanov, G.S. Ammosov, Z.G. Kornilova // Трубопроводный транспорт: теория и практика [Pipeline transport: Theory and practice]. — 2022. — №1(81). — P. 27-30. [in Russian]